

# DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE AO AR EM AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO PELO MÉTODO DA PRESSÃO DECRESCENTE<sup>(1)</sup>

Álvaro Pires da Silva<sup>(2)</sup>, Tairone Paiva Leão<sup>(3)</sup>, Cássio Antonio Tormena<sup>(4)</sup> & Antonio Carlos Andrade Gonçalves<sup>(4)</sup>

## RESUMO

A permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) determina o fluxo convectivo de gases na matriz do solo e a troca de gases na interface do sistema solo-atmosfera, influenciando diretamente a qualidade do ambiente físico para o crescimento de plantas e a taxa de ocorrência de processos dependentes da concentração de gases no solo. A  $K_a$  pode ser estimada por um método simplificado baseado em uma modificação da lei de Darcy para fluxo de gases no solo em pressão decrescente. Os objetivos deste trabalho foram modificar e aprimorar um permeâmetro para quantificar, em laboratório, a permeabilidade de amostras indeformadas de solos ao ar utilizando o método da pressão decrescente. Foram utilizados dois sistemas de aquisição de dados: um sistema eletrônico automatizado composto por um transdutor de pressão conectado a um datalogger (E1), e alternativamente um sistema composto de um manômetro digital para registro do decréscimo de pressão e um cronômetro (E2). No sistema E1, foram avaliadas amostras da camada superficial de um Nitossolo Vermelho eutroférico argiloso, coletadas na área experimental da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - USP, Piracicaba, SP, e no E2 foram avaliadas amostras de um perfil de Nitossolo Vermelho distroférico muito argiloso, coletadas em intervalos de profundidade em área experimental da Universidade Estadual de Maringá, PR. Os ensaios para a determinação de  $K_a$  foram realizados em amostras indeformadas de solo com variação na densidade do solo e no conteúdo de água. A  $K_a$  aumentou com a redução do conteúdo de água do solo em função do maior volume de poros ocupados com ar e com o decréscimo da densidade do solo devido ao aumento da porosidade total das amostras. Os resultados mostraram que o método é versátil, rápido, de fácil

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em maio de 2009 e aprovado em outubro de 2009.

<sup>(2)</sup> Professor Titular, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Caixa Postal 09, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: apsilva@esalq.usp.br

<sup>(3)</sup> Dr. em Solos e Nutrição de Plantas pela ESALQ/USP e PhD em Earth And Planetary Sciences. University Of Tennessee Knoxville. E-mail: trpleao@hotmail.com

<sup>(4)</sup> Professor Associado, Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista do CNPq. E-mails: catormena@uem.br; acagoncalves@uem.br

**aplicação e baixo custo para a determinação da  $K_a$ , independente do sistema de aquisição de dados utilizados.**

**Termos de indexação: aeração, densidade do solo, umidade do solo, funcionalidade do solo, processos do solo.**

**SUMMARY: DETERMINATION OF AIR PERMEABILITY IN UNDISTURBED SOIL SAMPLES BY THE DECREASING PRESSURE METHOD**

*Soil air permeability ( $K_a$ ) controls the convective gas flux in the soil matrix and at the soil-atmosphere interface, directly affecting the soil physical quality for plant growth and the rate of processes that depend on the soil gas concentration.  $K_a$  can be estimated by a simplified method based on a modification of Darcy's law for gas flow in soil under decreasing pressure. The objective of this research was to modify and improve a permeameter for laboratory quantification of  $K_a$  by the falling pressure method. Two data acquisition systems were used for this purpose: an electronic-automatic system composed of a pressure transducer connected to a datalogger (E1) and alternatively, a system composed of a digital manometer for measuring the pressure decrease and a chronometer (E2). In E1, samples of the surface layer of a "Nitossolo Vermelho eutroférico" (Alfisol) collected on the experimental farm of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP, Piracicaba, Sao Paulo, were evaluated, while in E2 samples of a "Nitossolo Vermelho distroférico" profile from different depths, collected from the experimental farm of the Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, were evaluated. The  $K_a$  tests were performed in undisturbed samples with variability in soil bulk density and water content. Overall  $K_a$  increased with decreasing soil water content and bulk density. This can be related to the increase in air-filled porosity volume with the decrease in these two variables. The results show that the apparatus is inexpensive, versatile, fast, and simple for  $K_a$  determination, independently of the data acquisition system.*

*Index terms: aeration, bulk density, soil moisture, soil physical functionality, soil processes.*

## INTRODUÇÃO

A concentração e as proporções relativas de  $O_2$  e  $CO_2$  no solo são fatores determinantes para o crescimento radicular e para processos biogeoquímicos que controlam os ciclos de nutrientes relacionados no sistema solo, como C, N e S. Em solos bem aerados, a composição do ar é próxima daquela do ar atmosférico, uma vez que o  $O_2$  consumido no solo é prontamente repostado e o dióxido de C gerado é liberado na atmosfera (Hillel, 1998). Assim, a capacidade do solo de promover a troca adequada de gases entre o ambiente radicular e a atmosfera afeta diretamente o crescimento de plantas. Isso faz com que a quantificação de propriedades relacionadas com a capacidade do solo em transmitir  $O_2$  até as raízes seja fundamental para a avaliação da qualidade física do solo. A permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) é um dos parâmetros físicos que governa o fluxo de gases no solo. Do ponto de vista ambiental,  $K_a$  tem sido utilizada na modelagem e na otimização de sistemas de extração de vapor para limpeza de solos contaminados com compostos orgânicos voláteis (Poulsen et al., 1996; Moldrup et al., 1998; Kawamoto et al., 2006; Switzer & Kosson, 2007), bem como em estudos relacionados ao transporte, à perda e à emissão de gases com efeito estufa.

Em termos agronômicos, um valor restritivo de porosidade de aeração para o crescimento das raízes (< 10 %) foi sugerido por Grable & Siemer (1968) e utilizado por Silva et al. (1994) e Leão et al. (2004) para quantificar o Intervalo Hídrico Ótimo. Os autores consideram que, em valores superiores a este, a difusão de  $O_2$  no solo não se torna limitante para as raízes. Entretanto, este índice é estático e a aeração do solo é um processo dinâmico co-dependente de outras características do solo e do ambiente. A  $K_a$  exibe uma relação não linear com a porosidade de aeração (Resurreccion et al., 2007), de modo que o conhecimento da  $K_a$  implica respostas mais exatas e confiáveis do comportamento dos gases no solo, em especial do  $O_2$ , quando comparada com a utilização de um valor constante de porosidade de aeração, por exemplo, de 10 %. Resurreccion et al. (2007) sugerem a medida de  $K_a$  e da porosidade com ar no potencial de -100 hPa como estratégia para rápida avaliação das propriedades físicas e da magnitude com que governam o transporte de gases. Um valor de  $K_a = 10^{-12} \text{ m}^2$  foi sugerido como limite crítico por McQueen & Shepherd (2002), abaixo do qual as condições físicas do solo poderiam ser limitantes para o crescimento das plantas.

As medidas de  $K_a$  são fortemente dependentes da estrutura do solo (Tuli et al., 2005; Iversen et al.,

2001b), particularmente em relação ao tamanho e à continuidade dos macroporos, justificando sua utilização na estimativa do espaço poroso que contribui para a transmissão de ar e água no solo. Apesar da elevada variabilidade espacial (Poulsen et al., 2001), a  $K_a$  é bastante sensível para discriminar os efeitos de diferentes práticas de manejo na estrutura do solo (Fish & Koppi, 1994). Blackwell et al. (1990) e Groenevelt et al. (1984) integraram a  $K_a$  e a porosidade ocupada com ar para quantificar modificações funcionais no sistema poroso decorrentes do manejo do solo e da atividade biológica. Sweeney et al. (2006) e Vogeler et al. (2006) utilizaram a  $K_a$  para avaliar os efeitos da compactação pelo tráfego de máquinas. Aspectos funcionais da macroporosidade, bem como a continuidade e a tortuosidade dos poros, têm sido descritos por propriedades relacionadas ao fluxo de gases no solo, incluindo a  $K_a$  (Ball, 1981; Roseberg & McCoy, 1990). Outros estudos têm utilizado a  $K_a$  para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_s$ ) e a difusividade do ar no solo ( $D$ ), considerando que as medidas de  $K_a$  são mais fáceis, mais rápidas e menos sujeitas a erros experimentais do que  $K_s$  e  $D$  (Moldrup et al., 1999; Iversen et al., 2001b; Wells et al., 2006).

Diferentes métodos têm sido propostos para medir a  $K_a$  em campo e, ou, em laboratório, no último caso utilizando-se de amostras indeformadas de solo. Corey (1986) e Iversen et al. (2001a) relatam diferentes estudos e os respectivos métodos e equipamentos necessários para a obtenção da  $K_a$ . Entretanto, a maioria desses métodos requer o uso de instrumentos de medida caros métodos complexos e em geral muito trabalhosos. Alguns autores sugerem a medida da  $K_a$  por meio do estudo do fluxo do ar em equilíbrio dinâmico, o que adiciona dificuldade e complexidade à medida. Kirkham (1946) propôs um método mais simples, baseado no decréscimo da pressão de ar num reservatório em função do tempo. Esse método foi utilizado por Whelan et al. (1995), em amostras de solo, e por McKenzie & Dexter (1996) para a determinação da  $K_a$  em agregados. McKenzie & Dexter (1996) efetuaram a medida também em amostras indeformadas e verificaram que a  $K_a$  nessas amostras era maior do que aquela obtida em agregados individuais, aparentemente devido a caminhos preferenciais para o fluxo de gases entre os agregados que compõem a estrutura do solo na amostra. Método similar foi utilizado por Li et al. (2004) para medir  $K_a$  em amostras de asfalto. Nos trabalhos de Kirkham (1946), McKenzie & Dexter (1996) e Li et al. (2003), o decréscimo de pressão foi medido utilizando um manômetro de água.

Neste trabalho, dois métodos de aquisição de dados foram utilizados para registrar os valores de decréscimo de pressão ( $P$ ) e tempo ( $t$ ). O primeiro foi um sistema eletrônico de aquisição dos dados de  $P$  e  $t$ , composto de transdutor de pressão conectado a um sistema de aquisição de dados (E1) e o segundo, mais simples, utiliza um manômetro com mostrador de

cristal líquido para identificar a pressão durante o seu decréscimo no interior do reservatório enquanto o tempo é medido com um cronômetro digital padrão (E2). Independente da maneira como os dados são obtidos, a permeabilidade do ar pode ser estimada por meio de solução analítica ajustada por regressão linear do decréscimo de pressão em função do tempo, demonstrada neste trabalho. No Brasil, há carência de informações sobre a  $K_a$ , particularmente por razões metodológicas tanto associadas aos métodos de medida quanto à disponibilidade de equipamentos. A aplicabilidade das medidas de  $K_a$  são inúmeras, mas assumem particular importância no contexto agrônomico e ambiental. Assim, este trabalho teve como objetivos aprimorar, tornar mais versátil e simplificar a metodologia de determinação, em laboratório, da permeabilidade do ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente.

## TEORIA

O desenvolvimento teórico para a quantificação da permeabilidade ao ar de amostras indeformadas de solo apresentado a seguir é uma atualização do procedimento descrito por Kirkham (1946), segundo o qual o fluxo de um gás no solo é sujeito a restrições comparado com o fluxo de água através de meios porosos, e é descrito pela equação de Darcy:

$$q = (k/\mu) (dp / dx) \quad (1)$$

Essa equação é aplicável se o fluxo ocorre horizontalmente ou se os componentes gravitacionais podem ser negligenciados. Nessa equação,  $q$  é a densidade de fluxo de água por unidade de tempo [ $L T^{-1}$ ];  $k$  é a permeabilidade do meio [ $L^2$ ];  $\mu$  é a viscosidade dinâmica da água [ $M L^{-1} T^{-1}$ ]; e  $dp / dx$  é o gradiente de pressão na direção  $x$  [ $M L^{-1} T^{-2}$ ] / [ $L$ ] = [ $M L^{-3} T^{-2}$ ].

Aplicada a uma seção tubular  $A$ , de comprimento  $L$ , com pressões  $P_1$  e  $P_2$  [ $M L^{-1} T^{-2}$ ] em suas extremidades e através da qual uma quantidade de água,  $V$ , flui por unidade de tempo,  $t$ , definindo uma vazão,  $Q$  [ $L^3 T^{-1}$ ], a equação (1) pode ser reescrita como:

$$Q = (k/\mu) A [(P_1 - P_2) / L] \quad (2)$$

A equação (2) pode ser utilizada para determinar a permeabilidade quando o fluxo ocorre no sentido horizontal.

Considerando-se o fluxo vertical e em sentido ascendente, a equação (2) é reescrita como:

$$Q = (k/\mu) A [(P_1 - P_2) / L - \gamma g] \quad (3)$$

sendo  $\gamma$  = densidade do fluido [ $M L^{-3}$ ];  $g$  = aceleração da gravidade [ $L T^{-2}$ ]; e  $\gamma g$  é a força agindo por unidade

de volume do fluido, no sentido descendente, em oposição à força por unidade de volume  $[(P_1 - P_2) / L]$  agindo no sentido ascendente.

No caso do fluxo de gases no do solo e, caso o fluxo seja viscoso, as equações acima serão válidas apenas se forem modificadas para levar em consideração a compressibilidade do gás. Entretanto, quanto se trata de gases, o termo gravitacional na última equação pode ser desprezado, conforme se demonstra a seguir.

Assumindo-se que  $(P_1 - P_2)$  é pequeno, em torno de 100 Pa (0,01 m de coluna de água) e que  $L$  é igual a 0,1 m, verifica-se que  $(P_1 - P_2) / L = 100 / 0,1 = 1.000 \text{ Pa m}^{-1}$ ; enquanto  $\gamma g = 1 \times 9,81 \approx 10 \text{ Pa m}^{-1}$ . Assim, mesmo neste caso extremo, em que a pressão é muito pequena e o fluxo é assumido como completamente vertical, o componente gravitacional é somente 1 % do componente de pressão e pode ser desprezado.

Para avaliar o efeito da compressibilidade, assume-se que a equação (1) é válida não somente para líquidos, mas também para gases. Entretanto, a equação (1) não pode ser integrada no caso de gases, como é feito no caso da água, uma vez que  $v$  não é constante;  $v$  aumenta à medida que o gás atinge pressões menores na extremidade do tubo. Para que a integração da equação (1) seja possível para gases, deve-se primeiramente estabelecer que o movimento de massa ao longo da coluna de fluxo será constante quando atingido o equilíbrio dinâmico, e que o fluxo (sendo lento) será isotérmico. Analiticamente, a primeira condição é:  $\gamma v = \text{constante}$ ,  $\gamma$  sendo a densidade do gás; e a segunda condição é:  $p = \gamma RT$ ,  $R$  sendo a constante do gás e  $T$  a temperatura (Kelvin), também constante. Combinando as duas condições, nota-se que  $p v$  é uma constante, de modo que se a equação (1) for multiplicada por  $p$  em ambos os termos:

$$p v = (k / \mu) p (dp / dx) \quad (4)$$

O termo à esquerda se torna uma constante e a integração imediatamente possível, de modo que para um tubo de comprimento  $L$  com suas extremidades nas pressões  $P_1$  e  $P_2$  a equação (4) se torna:

$$p v L = (k / \mu) (P_1^2 - P_2^2) / 2 \quad (5)$$

Esta equação pode ser rearranjada em uma forma mais útil, assumindo-se que  $p = P_2$ , a pressão de saída do tubo, e  $v = Q_2 / A$ , sendo  $Q_2$  o volume total de gás, deixando o tubo por unidade de tempo na pressão de saída. Desse modo:

$$P_2 (Q_2 / A) L = (k / \mu) (P_1^2 - P_2^2) / 2 \quad (6)$$

Em termos do fluxo de massa  $Q_m$  e densidade  $\gamma_2$  na saída do tubo:  $Q_2 = Q_m / \gamma_2$ , a equação (6) se torna:

$$Q_m = k \gamma_2 A (P_1^2 - P_2^2) / (2 \mu L P_2) \quad (7)$$

a qual pode ser resolvida para  $k$ , ou seja,  $K_a$ , para se determinar a permeabilidade.

A equação (7) é válida para fluxo de gases em solos em baixos gradientes de pressão, enquanto que sua validade em gradientes elevados não tendo sido verificada em condições experimentais. A permeabilidade ao ar de uma amostra indeformada de solo pode ser determinada em laboratório conhecendo-se o decréscimo da pressão em função do tempo no interior de um recipiente de ar acoplado à amostra de solo. À medida que o ar flui através da amostra, a pressão no interior do recipiente decresce. Com esses dados, a permeabilidade ao ar pode ser calculada, conforme demonstrado a seguir.

Seja  $M$  a massa do gás em um instante  $t$  no reservatório;  $V$  (constante) o volume do reservatório,  $T$  a temperatura (Kelvin) do gás, e  $R$  a constante dos gases, então,  $PV = MRT$ , e  $(dM / dt)$  a massa de gás fluindo do tanque para a amostra (solo) por unidade de tempo, a qual pode ser verificada por:

$$(dM / dt) = (V / RT) (dP / dt) \quad (8)$$

Uma vez que  $Q_m$  na equação (7) é igual a  $(dM / dt)$ , resulta, após algumas alterações na notação, em:

$$(V / RT) (dP / dt) = - K_a \gamma_a A (P^2 - P_a^2) / (2 \mu L Pa) \quad (9)$$

Como

$$P_a = \gamma_a R T \quad (10)$$

estabelece-se que

$$\frac{dP}{P^2 - P_a^2} = - \frac{K_a A}{2 \mu L V} dt \quad (11)$$

O sinal negativo é requerido uma vez que a pressão ( $P$ ) decresce com o incremento de tempo ( $t$ ).

Seja  $z_1$  o valor de  $P$  no tempo  $t_1$  e  $z_2$  o valor de  $P$  no tempo  $t_2$ , então a integração da equação (11) entre estes limites resulta na equação 12:

$$-\frac{1}{2P_a} \ln \frac{P+P_a}{P-P_a} \Big|_{z_1}^{z_2} = - \frac{K_a A}{2 \mu L V} t \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (12)$$

$$\ln \left( \frac{z_2 + P_a}{z_2 - P_a} \cdot \frac{z_1 - P_a}{z_1 + P_a} \right) = \frac{K_a A P_a}{\mu L V} (t_2 - t_1)$$

A equação (12) pode ser simplificada, assumindo-se que  $z_1$  e  $z_2$  apresentarão valores muito diferentes da pressão atmosférica no caso do estudo da permeabilidade do solo ao ar. Desse modo:

$$z_1 = P_a + P_{e1}$$

$$z_2 = P_a + P_{e2}$$

em que  $P_e$  é a pressão aplicada, excedente à pressão atmosférica. Assim, a equação (12) pode ser reescrita como:

$$\ln \left( \frac{P_{e1}}{P_{e2}} \cdot \frac{2 + \frac{P_{e2}}{P_a}}{2 + \frac{P_{e1}}{P_a}} \right) = \frac{K_a A P_a}{\mu L V} (t_2 - t_1) \quad (13)$$

a qual é ainda exata, desde que o fluxo de gás através do solo seja viscoso e que a distribuição de pressão através da coluna de solo corresponda, como foi assumido, à distribuição de pressões em equilíbrio dinâmico para uma pressão particular no reservatório.

No caso da determinação da permeabilidade ao ar em amostras de solo  $P_e$  não deverá ser superior a 5 kPa, de modo que  $P_e / P_a < 5 / 101,3 \approx 0,05$ . Como esse valor é pequeno com relação a 2, a equação (13) se simplifica para:

$$\ln \frac{P_{e1}}{P_{e2}} = \frac{K_a A P_a}{\mu L V} (t_2 - t_1) \quad (14)$$

Se a diferença de tempo  $t_2 - t_1$  para que a pressão decresça de um nível inicial  $P_{e1}$ , ou  $P_0$  (para simplificar a notação) para um nível inferior  $P_{e2}$ , ou  $P$ , for simbolizada como  $t$ , a equação (14) pode ser escrita como:

$$\ln P = - \frac{K_a A P_a}{\mu L V} t + \ln P_0 \quad (15)$$

Estabelecendo-se  $S = \frac{K_a A P_a}{\mu L V}$ , a equação (15) pode ser reescrita de forma que o coeficiente  $S$  pode ser estimado estatisticamente, por regressão linear, a partir de um conjunto de dados de  $\ln P$  versus  $t$  (Equação 16). Posteriormente, a permeabilidade ao ar da amostra (m, cm ou  $\mu\text{m}$ ) pode ser facilmente isolada da inclinação  $S$  da reta de ajuste (Equação 17).

$$\ln P = - S t + \ln P_0 \quad (16)$$

$$K_a = \frac{\mu L V}{A P_a} \cdot |S| \quad (17)$$

em que  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmica do ar ( $18,1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $V$  é o volume do reservatório ( $\text{m}^3$ );  $P_a$  é a pressão do ar atmosférico ( $101,3 \text{ kPa}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $L$  é o comprimento da amostra (m);  $A$  é a área da amostra ( $\text{m}^2$ ) e  $S$  é o módulo do declividade (ou slope) da reta definida pela equação (16). A equação (17) será utilizada para os cálculos da permeabilidade do solo ao ar das amostras deste estudo.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Descrição do permeâmetro utilizado para as medidas de $K_a$

O instrumento utilizado no trabalho foi adaptado de McKenzie & Dexter (1996) e é composto de um

cilindro de aço para GLP (gás liquefeito de petróleo) com volume de  $0,03 \text{ m}^3$  (30 L), dispositivo para a aplicação e alívio da pressão, recipiente para a inserção da amostra indeformada de solo e uma saída para os sistemas de coleta dos dados automatizado e manual. (Figura 1). O reservatório de aço foi revestido com isopor para evitar variações térmicas, que influenciam diretamente a pressão de vapor do ar em seu interior. A temperatura e a umidade relativa do ar podem influenciar significativamente sua viscosidade e consequentemente alterar o valor da permeabilidade do solo ao ar, portanto devem ser mantidas constantes durante os ensaios. O sistema automatizado de coleta dos dados de tempo e pressão utiliza um transdutor de pressão diferencial modelo 850S - TP1 fabricado pela Vectus® (com escala de 0 a  $10.000 \text{ Pa}$ ) e um sistema de aquisição e processamento de dados modelo AqDXY 3.0 fabricado pela Lynx Tecnologia®. A obtenção dos dados também pode ser feita por meio de um sistema manual para registrar o tempo e o decaimento de pressão no interior do reservatório. Para esta finalidade, podem-se utilizar manômetros digitais de elevada exatidão ou manômetros de Hg (ou água) para medir o decréscimo da pressão no interior do reservatório, bem como um cronômetro padrão para medir a variação do tempo, ambos facilmente disponíveis em laboratórios de física do solo.

A amostra é acondicionada no interior de um suporte cilíndrico (adaptador) com diâmetro interno levemente inferior ao diâmetro da amostra, de forma a não haver possibilidade de fluxo preferencial de ar entre a parede do suporte adaptador e o cilindro de aço que contém a amostra. Para isso, procedeu-se à instalação de um anel de obstrução (*O-ring*) de borracha na parte inferior do suporte cilíndrico e também a colocação de parafusos com arruelas de fixação que pressionam a parte superior do anel que contém a amostra contra a parte inferior do suporte cilíndrico e o anel de obstrução, mantendo a vedação do sistema. É necessário que a amostra esteja perfeitamente alinhada com a extremidade do anel de aço que a contém para reduzir a possibilidade de

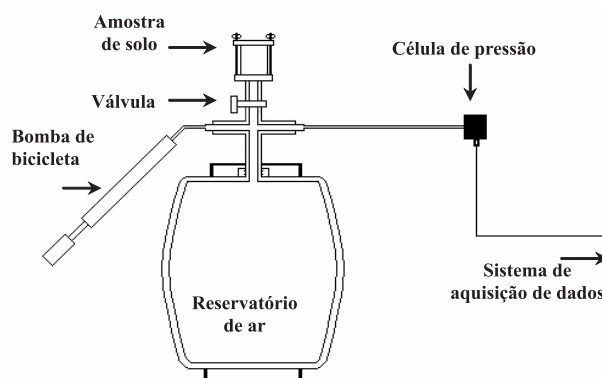


Figura 1. Instrumento utilizado para medir a permeabilidade de amostras indeformadas de solo ao ar.

vazamento de ar por fluxo preferencial na interface entre o solo e a parede do anel. Desse modo, todo o ar do interior do reservatório fluirá pela amostra, resultando num decréscimo exponencial da pressão com o tempo, registrada no manômetro ou no sensor de pressão. A válvula entre o reservatório e a amostra permanece inicialmente fechada para que o reservatório seja pressurizado. A utilização de uma bomba pneumática manual para pressurização de pneus de bicicleta é suficiente para esta finalidade. Ressalta-se que o método de pressão decrescente para a determinação da  $K_a$  é válido para regime de fluxo laminar de gases pela amostra (número de Reynolds  $< 2000$ ), exigindo a aplicação de baixas pressões no reservatório. A verificação da manutenção da inclinação da reta ao longo das medidas de pressão e tempo é um indicativo da ocorrência do fluxo laminar de ar na amostra.

### Determinação da permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ )

O princípio do método é baseado na quantificação do decréscimo da pressão no reservatório de ar em função do tempo, o qual é proporcional ao fluxo de ar que atravessa a amostra de solo. O teste compreende as seguintes etapas: a amostra é encaixada no suporte, conforme descrito na figura 1; com a válvula fechada, o reservatório é pressurizado (cerca de 1.000 Pa). A partir da pressurização do reservatório, recomendam-se cerca de 60 s para a estabilização da pressão no seu interior e, em seguida, a válvula é aberta. Na medida em que o ar flui pela amostra, o decréscimo da pressão no reservatório é registrado pelo sistema de aquisição de dados pelo manômetro digital ou de Hg. A vantagem do sistema automatizado de aquisição de dados é o registro automático dos dados de tempo e pressão. Com a utilização do sistema mecânico, recomenda-se a realização de um pré-teste antes do início experimental das medidas.

À medida que o ar atravessa a amostra, é gerado um decréscimo logarítmico da pressão interna do reservatório, que é medido em intervalos variáveis de tempo. Os dados registrados de pressão são transformados pela função logaritmo, de modo que a relação pressão *versus* tempo pode ser ajustada por uma função log-linear entre as duas variáveis. Assim, o coeficiente angular (ou inclinação) da função (S) é obtido com maior confiabilidade e exatidão por meio de ajuste por regressão linear (equação 16) quando comparado com o  $\omega$  obtido por Kirkham (1946) e McKenzie & Dexter (1996), em que são usados apenas dois pares de valores de pressão e tempo. A permeabilidade ao ar da amostra é calculada utilizando a equação 17.

As determinações da  $K_a$  foram realizadas em amostras provenientes de Nitossolos Vermelhos retiradas de duas áreas experimentais, com diferentes sistemas de uso e manejo, e com diferentes classes texturais. Os detalhes das áreas estudadas são apresentados a seguir.

### Estudo 1: Amostras da camada superficial de um Nitossolo Vermelho eutroférico cultivado com pastagem a longo prazo (E1)

Detalhes da área experimental e do manejo adotado estão descritos em Imhoff et al. (2000). Resumidamente, a área experimental pertence à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - USP, localizada na cidade de Piracicaba, SP. O solo é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico, cuja composição granulométrica apresenta 460 g kg<sup>-1</sup> de argila, 160 g kg<sup>-1</sup> de silte e 380 g kg<sup>-1</sup> de areia, classe textural argilosa.

Os pontos de amostragem foram selecionados de modo a se obterem duas amostras com diferentes densidades do solo na camada de 0–0,10 m. Retirou-se uma amostra indeformada de solo (anel de 0,05 m de altura e diâmetro) próximo da touceira das plantas, num local com elevada quantidade de raízes, e outra entre duas touceiras do capim, onde o pisoteio dos animais era intenso. Essas amostras apresentaram densidade do solo de 1,10 e 1,35 Mg m<sup>-3</sup>, próximo das touceiras e entre as touceiras, respectivamente. As medidas de  $K_a$  foram feitas nessas amostras em diferentes teores de água. Para isso, estabeleceu-se uma variação do teor de água promovendo o secamento gradativo das amostras em estufa a 40 °C por uma hora, em quatro etapas de secagem. Em seguida, as amostras foram pesadas e submetidas ao teste de permeabilidade. O teste foi realizado com a pressuposição de haver fluxo laminar de ar nas amostras e de que as pressões utilizadas eram suficientemente baixas para assegurar condições de não compressibilidade do ar. Os ensaios de permeabilidade ao ar foram realizados utilizando o permeômetro descrito associado a um sistema automatizado de coleta dos dados de tempo e pressão.

Ao final do processo, as amostras foram secas em estufa a 110 °C para a determinação da massa de sólidos e da massa de água, que foram utilizadas para o cálculo do teor de água em base de massa e da densidade do solo.

### Estudo 2: Experimento com amostras obtidas em diferentes camadas de um perfil de Nitossolo Vermelho distroférico (E2)

As amostras foram obtidas numa área de pesquisa em agricultura irrigada da Universidade Estadual de Maringá, localizada no município de Maringá, PR. O solo é classificado como Nitossolo Vermelho distroférico. A análise granulométrica do solo na profundidade de 0 a 0,15 m indicou a seguinte distribuição granulométrica: 735 g kg<sup>-1</sup> de argila, 90 g kg<sup>-1</sup> de silte e 175 g kg<sup>-1</sup> areia, classe textural muito argilosa. Esta área foi escolhida por se tratar de um solo de textura muito argilosa, cultivado com feijão irrigado e que tem problemas evidentes de aeração do solo nas camadas superficiais devido à sua degradação estrutural. Detalhes do histórico de uso e manejo da área estão descritos em Blainski et al. (2009).

A amostragem do solo foi realizada na segunda quinzena do mês de agosto de 2006. Procedeu-se à abertura de uma trincheira de 1 m de largura x 1 m de comprimento x 1,50 m de profundidade. Numa das paredes da trincheira, foi feita a coleta de amostras, em duplicata, no centro das camadas de 0–15, 15–30, 30–45, 45–60, 60–75, 75–90, 90–105 e 105–120 cm. As amostras indeformadas foram retiradas com anéis metálicos de 100 cm<sup>3</sup> de volume. Os anéis foram inseridos verticalmente no solo com o auxílio de um atuador hidráulico apoiado verticalmente ao pára-choque de um trator. Imediatamente após a retirada, as amostras foram envolvidas em papel alumínio, acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em um refrigerador até serem preparadas para análises.

As amostras foram saturadas pela elevação gradual da lâmina de água numa bandeja. Após completamente saturadas, as amostras foram drenadas no potencial equivalente a -100 hPa conforme sugestão de Resurreccion et al. (2007). Após atingirem o equilíbrio em cada potencial, as amostras foram pesadas e, em seguida, foram feitas as medidas de permeabilidade ao ar conforme descrito em E1, assumindo as pressuposições de fluxo laminar e ausência de compressibilidade de ar pela manutenção de pressão suficientemente baixa no reservatório. Nesse experimento, a coleta dos dados de pressão foi feita por meio de um manômetro digital com escala de 0–2 bar (exatidão de 0,001 bar) associado a um cronômetro para medir a variação do tempo. Os dados de pressão foram transformados pela função logarítmica e utilizados no ajuste por regressão linear de pressão *versus* tempo para a obtenção do parâmetro S (slope ou inclinação da reta), necessário ao cálculo da permeabilidade ao ar pela equação (17). Nesse experimento, a permeabilidade ao ar foi também comparada a outras propriedades referentes à retenção de água e aeração determinados nas mesmas amostras. As propriedades da curva de retenção de água (CRA): umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ),  $n$  e  $\alpha$  foram determinados conforme van Genuchten (1980); a porosidade de aeração foi calculada como o volume de poros preenchidos com no potencial de -100 hPa. O parâmetro  $n$  é indicativo da inclinação da CRA e, portanto, da sua distribuição de poros, enquanto  $\alpha$  corresponde ao inverso do valor de potencial mátrico de entrada de ar no solo (van Genuchten, 1980). Uma vez que  $K_a$  está relacionada ao volume e continuidade dos poros, é possível que esteja correlacionada a esses parâmetros.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no E1 com duas amostras de diferentes densidades e variação nos teores de água são apresentados nas figuras 2 e 3. A figura 2 apresenta a forma original dos dados de decaimento exponencial da pressão com o tempo (Figura 2a), bem

como após a linearização dos dados de decaimento da pressão por meio de transformação logarítmica, tornando a função linear (Figura 2b). Como os dados de tempo não são linearizados, a relação entre as duas variáveis é log-linear, onde apenas um dos eixos é logarítmico. Os dados na forma da figura 2b são utilizados para calcular o coeficiente angular (S) por meio de regressão linear simples, gerando maior exatidão estatística quando comparado com as estimativas feitas por Kirkham (1946) e MacKenzie & Dexter (1996), com apenas dois pares de valores de pressão e tempo.

Os valores de  $K_a$  calculados para as amostras com densidade do solo de 1.100 kg m<sup>-3</sup> e 1.350 kg m<sup>-3</sup>, em função do decréscimo no teor de água do solo, são apresentados na figura 3. Como esperado,  $K_a$  aumentou com o secamento do solo (MacKenzie & Dexter, 1996; Otten et al., 1999). Esse comportamento pode ser explicado pela formação de caminhos preferenciais contínuos através dos poros do solo à medida que a água é drenada. Os menores valores de  $K_a$  na amostra de  $D_s = 1.350$  kg m<sup>-3</sup>, comparada à amostra de  $D_s = 1.100$  kg m<sup>-3</sup>, são compatíveis com a

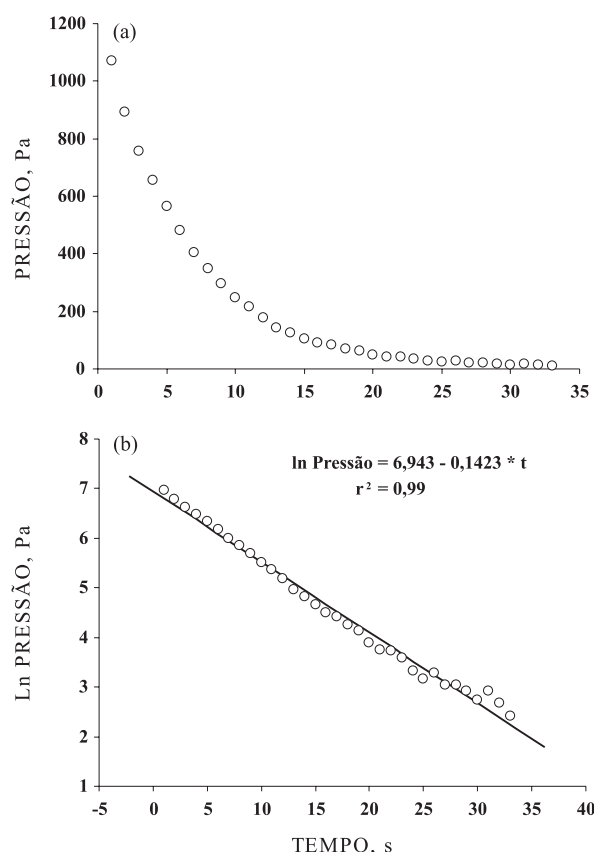


Figura 2. Relação entre decréscimo da pressão *versus* tempo para uma amostra indeformada de solo do estudo E1. Relação observada experimentalmente (a) e relação linearizada (b), de em que é obtida inclinação S (em módulo) utilizada no cálculo da permeabilidade ao ar.

redução na porosidade total e notadamente no volume de macroporos associado com a compactação do solo (Rosenberg & McCoy, 1992; Sweeney et al., 2006).

Os valores médios de permeabilidade ao ar obtidos para as amostras com densidade de  $1.100$  e  $1.350 \text{ kg m}^{-3}$  foram de  $7,181 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  e  $1,971 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , respectivamente. Os resultados podem ser expressos conforme propõe McKenzie & Dexter (1996), com transformação logarítmica ou conforme propõe Otten et al. (1999), como potência de  $10^{-10} \text{ m}^2$  (Figura 3). Conforme pode ser visualizado na figura 3, a permeabilidade ao ar do solo depende basicamente de dois fatores, o conteúdo de água e a densidade, e ambos influenciam a geometria e a continuidade do sistema poroso do solo. Outro fator que pode influenciar  $K_a$  é a conectividade dos poros, entretanto essa propriedade não foi avaliado nesse estudo.

A permeabilidade ao ar é inversamente relacionada com o conteúdo de água do solo, de modo que, quanto menor a proporção de poros com ar, menor é a permeabilidade do solo ao ar (Figura 4a). O máximo valor de permeabilidade é alcançado com solo seco e este vai progressivamente diminuindo com o umedecimento do solo, até próximo de zero na saturação (Ball & Schjonning, 2002). Normalmente, meios

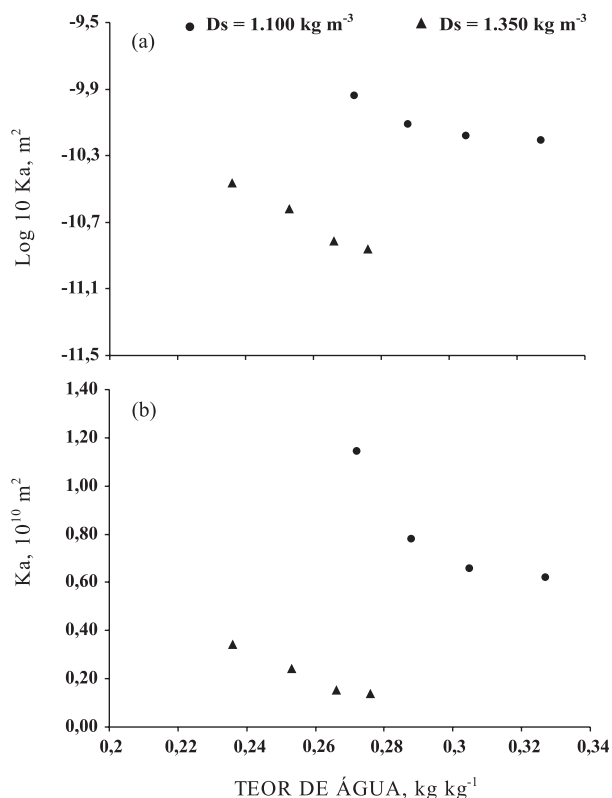


Figura 3. Relação entre a permeabilidade do solo ao ar e a umidade gravimétrica para um Nitossolo Vermelho eutroférico de textura argilosa em duas densidades. Resultados expressos conforme McKenzie & Dexter (1996) (a). Resultados expressos conforme Otten et al. (1999) (b).

porosos em condições naturais contêm pelo menos dois fluidos (geralmente água e ar) de modo que o espaço disponível para o fluxo de ar corresponde ao espaço livre de água (Koorevar et al., 1983). Na figura 4a, pode-se observar a influência do teor de água do solo na variação do S para a amostra de  $D_s = 1.350 \text{ kg m}^{-3}$ . No maior teor de água do solo foi obtido o menor valor de ( $|S| = 0,097$ ) e consequentemente menor  $K_a$ . Com o secamento da amostra, observou-se um aumento progressivo no valor S, provavelmente associado ao maior volume de poros e à formação de caminhos preferenciais para o fluxo de ar à medida que poros de tamanhos menores são progressivamente drenados.

O aumento da densidade do solo normalmente provocado pela compactação causa alterações na estrutura do solo, afetando o tamanho, a distribuição, a continuidade, o volume e a geometria dos poros (Lima et al., 2005), reduzindo a  $K_a$  em dado conteúdo de água. Na figura 4b, pode ser observada a variação do S em função da densidade solo. Em uma mesma umidade, a amostra de solo com  $D_s = 1.100 \text{ kg m}^{-3}$  (menor densidade) apresentou um S maior ( $|S| = 0,462$ ) e consequentemente maior permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) quando comparado com a amostra com maior densidade do solo ( $D_s = 1.350 \text{ kg m}^{-3}$ ). Esses resultados estão em acordo com Rosenberg & McCoy (1990) e Sweeney et al. (2006) e com Resurreccion et al. (2007), que indicam que a magnitude de  $K_a$  é

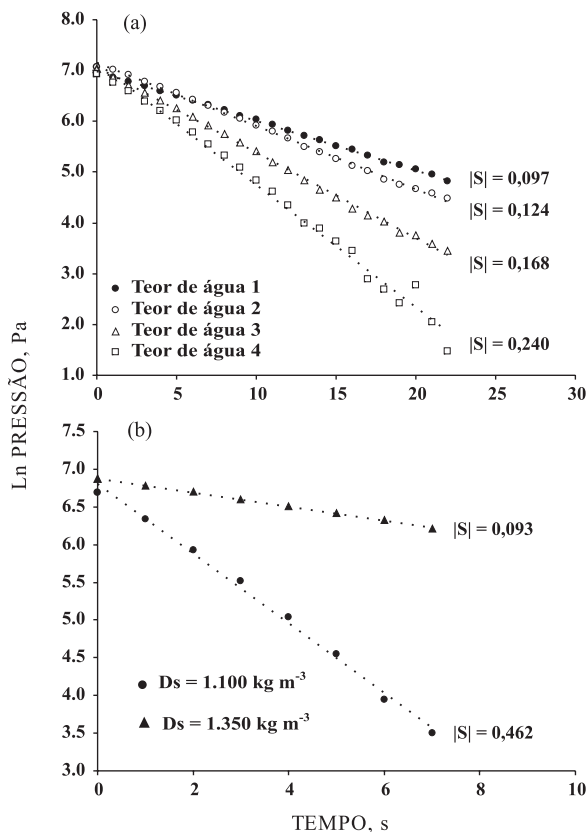


Figura 4. Influência do teor de água (a) e da densidade do solo (b) na variação do S.



fortemente dependente da estrutura do solo. Além da influência da densidade do solo nos fatores geometria, volume e conectividade dos poros,  $K_a$  pode ter sido afetada pela porosidade resultante da atividade biológica nas amostras retiradas na posição touceira. É provável que caminhos de fluxo preferencial devido à presença de canais de raízes e da atividade de macrofauna estejam presentes em maior quantidade nesta posição de amostragem.

Os resultados do E2 incluem amostras de diferentes camadas de solo, isto é, com diferentes características estruturais ocasionadas pela influência do manejo nas camadas superficiais e diferenças na estrutura em profundidade em função dos processos pedogenéticos e pela carga causada pelas camadas sobrejacentes (*overburden*). As medidas de permeabilidade ao ar foram feitas com as amostras equilibradas no potencial de -100 hPa, conforme sugerido por Resurreccion et al. (2007). Esse potencial também tem sido associado ao conteúdo de água na capacidade de campo em solos tropicais (Reichardt, 1988).

Na figura 5 são representados o decréscimo da pressão (hPa) com o tempo, na escala linear (Figura 5a) e com transformação logarítmica da pressão (Figura 5b) para os dados do E2. A densidade do solo exerce influência direta no módulo da

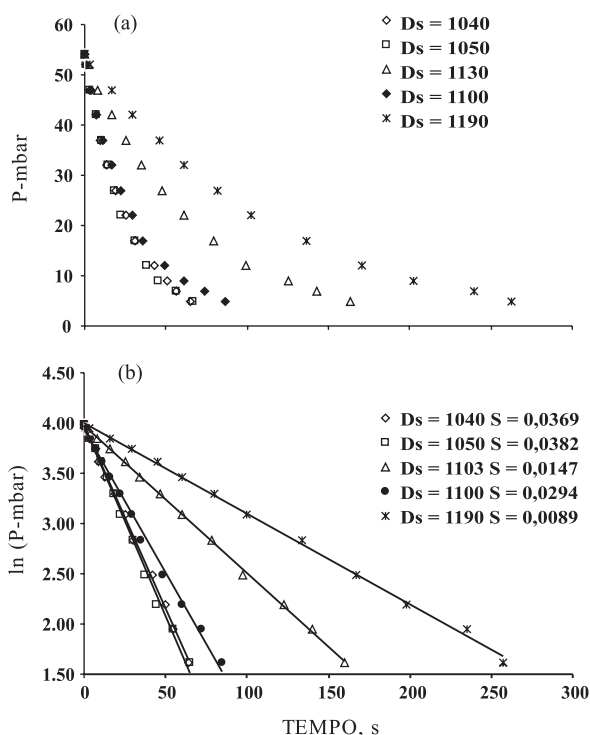


Figura 5. Relação entre decréscimo da pressão versus tempo para algumas amostras indeformadas de solo do estudo E2. Relação observada experimentalmente (a) e relação linearizada (b), em que é obtida inclinação S (em módulo) utilizada no cálculo da permeabilidade ao ar. Ds: densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

inclinação das retas (S). O valor S diminui com o aumento da densidade, indicando decréscimo da  $K_a$  (Figura 5b). Conforme mencionado anteriormente, o aumento da densidade está relacionado a uma alteração da geometria, volume e distribuição dos poros (Lima et al., 2005), reduzindo os caminhos e o volume total de espaço poroso disponível para o fluxo de ar. Isso implica uma redução da capacidade do solo em promover trocas gasosas e na qualidade do ambiente físico para o crescimento radicular. Como a densidade do solo foi maior em superfície, decrescendo em profundidade, a qualidade física do solo com relação à aeração diminuiu nas camadas superficiais, o que pode estar relacionado diretamente à degradação estrutural causada pelo manejo. A relação entre densidade do solo e  $K_a$  é apresentada na figura 6. A influência da  $D_s$  em  $K_a$  é confirmada pelo elevado coeficiente de determinação entre as duas variáveis ( $R^2 = 0,94$ ).

A permeabilidade ao ar calculada no E2 foi correlacionada aos parâmetros físico-estruturais do solo  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$  obtidos da equação de van Genuchten (1980) e à porosidade de aeração calculada com as amostras equilibradas no potencial de -100 hPa ( $\phi_{100 \text{ hPa}}$ ). As correlações entre  $K_a$  e  $\alpha$  e  $K_a$  e  $\phi_{100 \text{ hPa}}$  foram altamente significativas com  $r = 0,75$  e  $p = 0,0008$  para  $K_a$  e  $\alpha$  e  $r = 0,92$  e  $p < 0,0001$  para  $K_a$  e  $\phi_{100 \text{ hPa}}$ . Tais resultados têm implicações importantes em pesquisas futuras. Com relação à  $\alpha$ , é possível que tal parâmetro, definido por van Genuchten como o inverso do valor pressão de entrada de ar no solo, esteja relacionado à permeabilidade do solo ao ar, podendo ser utilizado para desenvolver funções de pedotransferência para estimar  $K_a$  quando esta não estiver disponível. Isso também implica a possibilidade de obter soluções analíticas para a função  $K_a$  semelhantes à função  $K_s$  proposta por van Genuchten (1980). Com relação aos dados de porosidade de aeração no potencial de -100 hPa é possível que uma propriedade estática ( $\phi_{100 \text{ hPa}}$ ) possa vir a ser utilizada como um índice para estimativa de uma propriedade dinâmica, porém mais dados são necessários para validar essas teorias.

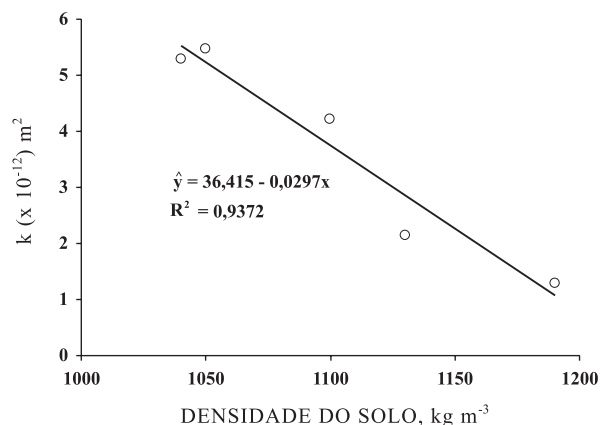


Figura 6. Influência da densidade do solo na permeabilidade ao ar de amostras de solo do estudo E2.

## CONCLUSÕES

1. A adaptação sugerida neste trabalho mostrou-se eficiente para a avaliação da permeabilidade do solo ao ar.

2. A permeabilidade ao ar avaliada mostrou-se sensível às alterações de densidade e teor de água dos solos estudados. Assim, essa propriedade provou ser útil na avaliação da qualidade física do solo.

3. A permeabilidade ao ar possui correlação significativa com as propriedades físico-estruturais do solo:  $\alpha$  da equação de van Genuchten e com a porosidade de aeração de amostras equilibradas no potencial de -100 hPa.

## LITERATURA CITADA

- BALL, B.C. & SCHJONNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. Methods of soil analysis. Physical methods. Madison, Soil Science Society of America, 2002. Part 4. p.1141-1158. (Book Series, 5)
- BALL, B.C. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and air permeabilities and air-filled porosities. *J. Soil Sci.*, 32:483-498, 1981.
- BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWAR DANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C. & MASON, W.K. The use of air filled porosity and intrinsic permeability to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. *J. Soil Sci.*, 41:215-228, 1990.
- BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V. & GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférrico irrigado. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:273-281, 2009.
- COREY, A.T. Air permeability. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.1121-1136.
- FISH, A.N. & KOPI, A.J. The use of a simple field air permeability as a rapid indicator of functional soil pore space. *Geoderma*, 63:255-264, 1994.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:180-186, 1968.
- GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D. & GRANT, C.D. Physical assessment of soil with respect to rooting potential. *Geoderma*, 34:101-114, 1984.
- HILLEL, D. Environmental soil physics. San Diego, Academic Press, 1998. 771p.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Aplicação da curva de resistência do solo à penetração no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:1493-1500, 2000.
- IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P. & LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. *Soil Sci.*, 166:643-659, 2001b.
- IVERSEN, B.V.; SCHJONNING, P.; POULSEN, T.G. & MOLDRUP, P. *In situ*, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale. *Soil Sci.*, 166:97-106, 2001a.
- KAWAMOTO, K.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P.; IVERSEN, B.V.; ROLSTON, D.E. & KOMATSU, T. Gas transport parameters in the vadose zone: Gas diffusivity in field and lysimeter soil profiles. *Vadose Zone J.*, 5:1194-1204, 2006.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 11:93-99, 1946.
- KOOREVAAR, P.; MENELIK, G. & DIRKSEN, C. Elements of soil physics. Developments in soil science. 3.ed. Amsterdam, 1983. 230p.
- LEÃO, T.T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:415-432, 2004.
- LI, H.; JIAO, J.J. & LUK, M. A falling-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory. *J. Hydrol.*, 286:69-77, 2004.
- LIMA, H.V.; LIMA, C.L.R.; LEÃO, T.P.; COOPER, M.; SILVA, A.P. & ROMERO, R.E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:677-684, 2005.
- MCKENZIE, B.M. & DEXTER, A.R. Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. *J. Agric. Eng. Res.*, 65:23-28, 1996.
- McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. *Soil Till. Res.*, 25:217-230, 2002.
- MOLDRUP, P.; POULSEN, T.G.; SCHJONNING, P.; OLESEN, T. & YAMAGUCHI, T. Gas permeability in undisturbed soils: Measurement and predictive models. *Soil Sci.*, 163:180-189, 1998.
- MOLDRUP, P.; OLESEN, T.; YAMAGUCHI, T.; SCHJONNING, P. & ROLSTON, D.E. Modelling diffusion and reaction in soils. VIII. Gas diffusion predicted from single-potential diffusivity or permeability measurements. *Soil Sci.*, 164:75-81, 1999.
- OTTEN, W.; GILLIGANA, C.A.; WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. & HALL, D. Continuity of air-filled pores and invasion thresholds for a soil-borne fungal plant pathogen, *Rhizoctonia solani*. *Soil Biol. Biochem.*, 31:1803-1810, 1999.
- POULSEN, T.G.; IVERSEN, B.V.; YAMAGUCHI, T.; MOLDRUP, P. & SCHJONNING, P. Spatial and temporal dynamics of air permeability in a constructed field. *Soil Sci.*, 166:153-162, 2001.

- POULSEN, T.G.; MASSMANN, J.W. & MOLDRUP, P. Effects of vapor extraction on contaminant flux to atmosphere and ground water. *J. Environ. Eng.*, 122:700-706, 1996.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- RESSURECCION, A.C.; KAWAMOTO, K.; KOMATSU, T.; MOLDRUP, P.; OZAKI, N. & ROLSTON, D.E. Gas transport parameters along field transects of a volcanic soils. *Soil Sci.*, 172:3-16, 2007.
- ROSEBERG, R.J. & McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:969-974, 1990.
- ROSEBERG, R.J. & McCOY, E.L. Tillage and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: Air permeability assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1261-1267, 1992.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- SWEENEY, D.W.; KIRKHAM, M.B. & SISSON, J.B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. *Agron. J.*, 98:637-643, 2006.
- SWITZER, C. & KOSSON, D.S. Evaluation of air permeability in layered unsaturated materials. *J. Contam. Hydrol.*, 90:125-145, 2007.
- TULI, A.; HOPMANS, J.W. & ROLSTON, D.E. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:1361-1371, 2005.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- VOGELER, I.; CHICHOTA, R.; SIVAKUMARAN, S.; DEURER, M. & McIVOR, I. Soil assessment of apple orchards under conventional and organic management. *Aust. J. Soil Res.*, 44:745-752, 2006.
- WELLS, T.; FITYUS, S.; SMITH, D.W. & MOE, H. The indirect estimation of saturated hydraulic conductivity of soils, using measurements of gas permeability. I. Laboratory testing with dry granular soils. *Aust. J. Soil Res.*, 44:719-725, 2006.
- WHELAN, B.M.; KOPPI, A.J.; McBRATNEY, A.B. & DOUGHERTY, W.J. An instrument for the *in situ* characterisation of soil structural stability based on the relative intrinsic permabilities to air and water. *Geoderma*, 65:209-222, 1995.